

INTERNATIONAL SEMINAR ON MODERNIZATION OF HOISTING MACHINES -
RELIABILITY AND WORK SAFETY

Jan KOCUREK, Jerzy ZDRZĄŁEK

Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Elektrotechniki i Automatyki
Górnictwej - EMAG, Katowice, Polska

ZASTOSOWANIE KASKAD TYRYSTOROWYCH W NAPĘDACH MASZYN WYCIĄGOWYCH

Streszczenie. W referacie omówiono układy kaskad tyristorowych w napędach maszyn wyciągowych przekładniowych, układy sterowania i regulacji prędkości oraz wyniki pomiarów i spostrzeżenia z eksploatacji maszyn wyciągowych wyposażonych w kaskady tyristorowe.

1. WSTĘP

W górnictwie węglowym, oprócz głównych maszyn wyciągowych z napędami prądu stałego sterowanych w układach maszynowych Leonarda lub za pośrednictwem przekształtników tyristorowych, są często stosowane pomocnicze maszyny przekładniowe z silnikami indukcyjnymi pierścieniowymi. Maszyny te, z silnikami o mocach 65 - 160 kW na napięcie 500 V oraz 250 - 1000 kW na napięcie 6 kV, są w dalszym ciągu projektowane i produkowane.

Regulacja prędkości jazdy maszyn asynchronicznych odbywa się przez wtrącanie do obwodu wirnika stopniowo przełączanych rezystorów, w których w postaci ciepła wydziela się moc poślizgu wirnika. Często pogarszający się stan szybu zmusza do trwałego ograniczenia maksymalnej prędkości jazdy, co powiększa straty regulacyjne oraz ujemnie wpływa na trwałość rezystorów, jak i układu stycznikowego. Powoduje to, że maszyny te mają niską sprawność z powodu dużych strat energii w rezystorach regulacyjnych. Zastąpienie regulacji rezystorowej układem tyristorowym pozwala nie tylko na zmniejszenie zużycia energii elektrycznej, ale również polepsza sterowność maszyny przez wprowadzenie regulacji bezstopniowej. Zmniejszenie zużycia energii uzyskuje się przez odzyskanie mocy poślizgu wirnika i wprowadzenie jej do sieci energetycznej zarówno przy pracy silnikowej w cyklach podnoszenia, jak i podczas hamowania dynamicznego, gdy następuje odzyskanie energii kinetycznej lub potencjalnej w cyklach opuszczania. Na podstawie pomiarów doświadczalnej instalacji kaskady tyristorowej o mocy 800 kW, można stwierdzić około dwukrotne

zwiększenie sprawności napędu maszyny 1 w zależności od ilości poszczególnych cykli roczne oszczędności energii, odniesione do mocy zainstalowanej silnika, od 500 ÷ 1250 kWh/kW/rok.

2. UKŁAD PODSTAWOWY MASZYNY WYCIĄGOWEJ Z NAPĘDEM TKP

Uproszczony schemat układu tyrystorowej kaskady podsynchronicznej do napędu maszyny wyciągowej przedstawiono na rys. 1.

Zasada regulacji prędkości obrotowej asynchronicznego silnika pierścieniowego polega na wprowadzeniu do obwodu wirnika zewnętrznego napięcia, skierowanego przeciwnie do napięcia indukowanego w jego uzwojeniu. Napięcie na pierścieniach silnika U_{20} ze zmianą prędkości obrotowej zmienia swoją wartość i częstotliwość, co uniemożliwia bezpośrednie przyłączenie pierścieni ślizgowych do sieci zasilającej. Z tego powodu napięcie wirnika wyprostowane zostaje w prostowniku diodowym MD. Wartość napięcia wyprostowanego wyznaczamy z wzoru:

$$U_d = k_u \cdot U_{20} \cdot s - \frac{3 \cdot I_d \cdot X_s}{\pi} \quad /1/$$

gdzie: U_d - wyprostowane napięcie wirnika,
 U_{20} - napięcie wirnika dla $s = 1$, $I_d = 0$,
 I_d - prąd obwodu wyprostowanego,
 X_s - reaktancja rozproszenia jednej fazy silnika,
 s - poślizg silnika $/s = \frac{n - n_1}{n_1} / \quad /n_1 = \frac{60}{p} \cdot \frac{1}{\text{min}} /$,
 k_u - współczynnik skojarzenia prostownika.

Napięciu temu przeciwstawiają się napięcia szeregowo połączonych prostowników tyrystorowych 1MT i 2MT. Wartości tych napięć wynoszą:

$$U_{d1} = k_u \cdot U_{T2} \cdot \cos \alpha_1 - \frac{3 I_d \cdot X_{T2}}{\pi} \quad /2/$$

$$U_{d2} = k_u \cdot U_{T3} \cdot \cos \alpha_2 = \frac{3 I_d \cdot X_{T3}}{\pi} \quad /3/$$

gdzie: U_{d1} , U_{d2} - napięcia wyprostowane prostowników 1MT, 2MT,
 U_{T2} , U_{T3} - napięcia wtórne transformatora TPS,
 X_{T2} , X_{T3} - reaktancja rozproszenia uzwojeń transformatora TPS,
 α_1 i α_2 - kąty wysterowania fazowego tyrystorów.

Wychodzące z równania koła napięć obwodu prądu wyprostowanego /rys. 1/ można wyznaczyć zależność poślizgu /prędkości napędu/ s od kątów wysterowania prostowników α_1 i α_2 :

$$s = \frac{k_u / U_{T2} \cdot \cos \alpha_1 + U_{T3} \cdot \cos \alpha_2 / - \frac{3}{R} I_d / X_s + X_{T1} + X_{T2} /}{k_u \cdot U_{20}} \quad /4/$$

Na podstawie równania /4/ można stwierdzić, że poślizg silnika s , a tym samym prędkość maszyny pracującej w układzie TKP zależy od kątów wysterowania tyrystorów α_1 i α_2 oraz prądu obciążenia I_d .

Zakres regulacji prędkości obrotowej silnika zależy od dobrania napięć wtórnych U_{T2} i U_{T3} transformatora TPS. Dla maszyny wyciągowej wymagany zakres regulacji prędkości wynosi od $V = 0$ do $V = V_n$. Dla spełnienia tego warunku napięcie wtórne transformatora TPS należałoby tak dobrać, aby w chwili włączenia maszyny do sieci prąd I_d w obwodzie prądu wyprostowanego był zbliżony do zera. W konsekwencji suma wartości skutecznych napięć U_{T2} , U_{T3} byłaby większa od napięcia U_{20} , co utrudniłoby zapalenie się tyrystorów w prostowniku 1MT i 2MT. Dlatego napięcie U_{T2} i U_{T3} dobrano tak, że dolny zakres regulacji nieobciążonej maszyny rozpoczyna się od prędkości $V = 0,1 V_n$. Warunki ruchowe maszyny narzucają konieczność regulowania prędkości mniejszej od $0,1 V_n$ /np. podczas rewizji szybu/. Uzyskuje się to przez włączenie w obwód prądu wyprostowanego rezystora R_r . Przy prędkościach większych od $0,1 V_n$ rezystor ten zostaje bocznikowany stycznikiem SD.

3 . HAMOWANIE DYNAMICZNE MASZYNY

Hamowanie maszyny przy opuszczaniu przedmiotów oraz podczas zatrzymywania odbywa się z wykorzystaniem silnika napędowego jako przetwornika mocy mechanicznej na moc elektryczną. W tym celu stojan wzbudzany jest prądem stałym z prostownika 3MT, a wirnik pozostaje przyłączony do sieci 6 kV poprzez układ przekształtnikowy MD, 1MT i 2MT i transformator TPS. W ten sposób energia potencjalna opuszczanych mas oraz kinetyczna rozpędzonej maszyny przekazywana jest do sieci zasilającej. W układzie z regulacją rezystorową energia ta jest tracona bezpowrotnie na rezystorach, gdzie przetwarzana jest na ciepło.

Intensywność hamowania dynamicznego w układzie TKP zależy od prądu wzbudzenia stojana I_w i prądu kaskady I_d . Prądy te zależą od położenia drążka manewrowego, który wpływa na wysterowanie prostowników 1MT i 2MT. Maszynista decyduje więc o intensywności hamowania.

4. ZAŁOŻENIA STEROWANIA I STRUKTURA UKŁADU REGULACJI NAPĘDU

W przypadku modernizacji istniejącego napędu maszyny, z zachowaniem możliwości jego pracy tradycyjnej, rozpoczęcie sterowania jest uzależnione od przygotowania układu podstawowego i uprawnienia odpowiedniego wariantu sterowania. Konsekwencją tego stanu, po samoczynnym załączeniu potrzeb własnych i kontroli sprawności podzespołów, jest gotowość układu potwierdzona sygnałem optycznym. Umożliwia to sterowanie wyłącznika mocy WG, który w przypadku kaskady załącza bieg jałowy transformatora. Sterowanie silnika stycznikami rewersyjnymi 6 kV, 1SN i 2SN oraz hamowania dynamicznego SHD uzależniono od wychylenia drążka manewrowego zarówno w układzie tradycyjnym, jak i kaskady.

Wszystkie stany nieprawidłowej pracy kaskady, wynikające z zadziałania zabezpieczeń wewnętrznych przekształtnika, powodują samoczynne wyłączenie napędu wyłącznikiem głównym WG działającym również na obwód hamulca bezpieczeństwa.

Zasadniczymi podzespołami wchodzącymi w skład układu regulacji napędu są:

- zadajnik indukcyjny /selsynowy/ ZO na stałe sprzężony za pośrednictwem przekładni zębatej z drążkiem manewrowym,
- blok automatyki napędu US-A21,
- dwa bloki sterowników US-43, realizujące funkcje US-A21 w zakresie fazowegoysterowania falowników 1MT i 2MT,
- blok automatyki wzbudzenia do hamowania dynamicznego US-A3,
- blok sterownika US-43, realizujący funkcję US-A3 w zakresie fazowegoysterowania prostownika wzbudzenia PHD,
- bloki pomocnicze telemetrii US-TA, przetworników US-P1 i automatyki zakłóceniewej US-Z4 realizujące funkcje przygotowania sygnałów analogowych i logicznych o odpowiednich poziomach i sekwencjach,
- tachoprądnica TG o kontrolowanej sprawności do pomiaru prędkości rzeczywistej,
- czujniki prądu 1CI, 2CI separowane przekładnikami prądowymi do pomiaru rzeczywistych prądów wirnika i wzbudzenia stojana,
- czujnika napięcia obwodu pośredniego CN do pomiaru napięcia wirnika.

Dwupętlowy układ automatycznej regulacji /rys. 2/ pracuje z ujemnymi sprzężeniami zwrotnymi w zewnętrznej pętli prędkościowej i wewnętrznej prądowej. Pętla zewnętrzna spełnia funkcję stabilizacji prędkości w oparciu o pomiar prędkości rzeczywistej z tachoprądnicy. Sygnał błędu regulatora prędkości jest sygnałem wejściowym pętli wewnętrznej, prądowej, współpracującej z czujnikiem prądu rzeczywis-

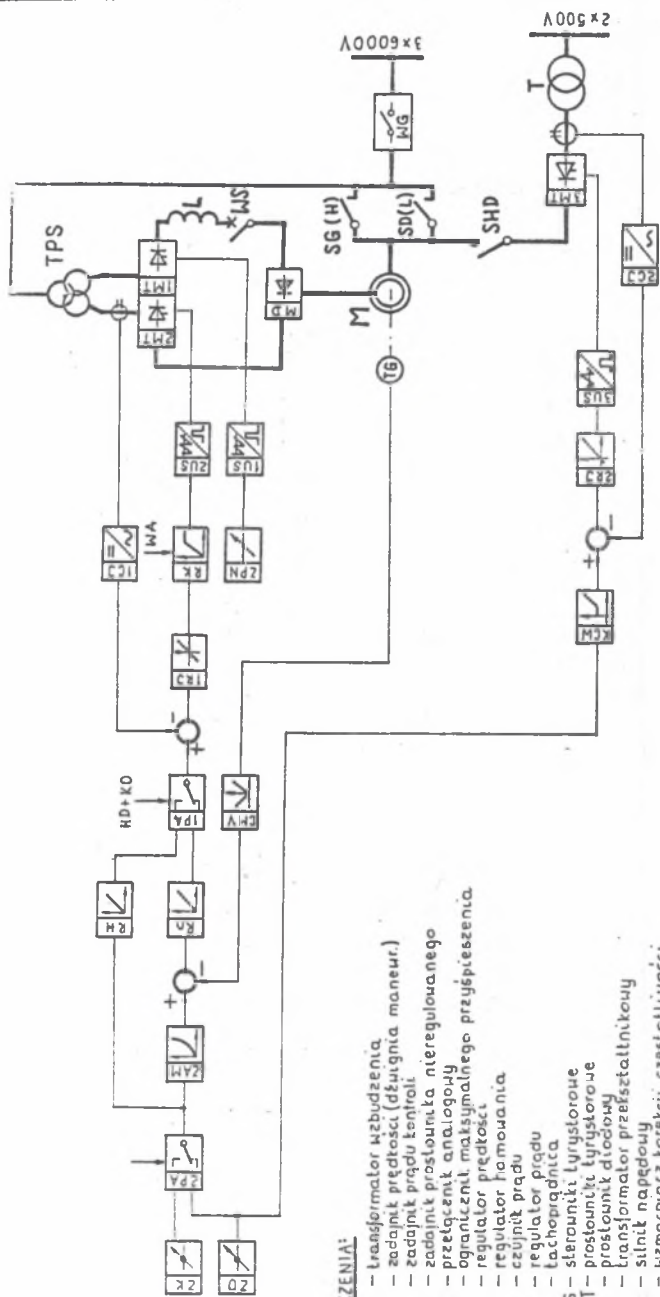


Fig. 2. Schemat blokowy układu regulacji maszyny wyciągowej w układzie kaskady pod synchroniczną

ŹNACZENIA:

- T — transformator wzbudzenia
- Z0 — zadajnik prędkości (dźwignia manewr.)
- ZK — zadajnik prądu kontroli
- ZPN — zadajnik prostownika nieregulowanego
- L2PA — przetłacznik analogowy
- ZAM — ogranicznik maksymalnego przyspieszenia
- RN — regulator prędkości
- RH — regulator hamowania
- L2CJ — czujnik prądu
- L2RD — regulator prądu
- TG — tachoprądnicza
- L23US — sterowniki tyrystorowe
- L23MT — prostowniki tyrystorowe
- MD — prostownik diodowy
- TPS — transformator przelastatnikowy
- M — silnik napędowy
- RK — wzmacniacz korekcyjnej częstotliwości
- CMV — człon modułowy prędkości
- SG(D) — silnik kierunkowy
- SHD — stycznik hamowania dynamicznego

SYGNALY:

- WA — sygnał logiczny praca - pozycja (blokady, pozostawa)
- KD — sygnał logiczny kontroli
- HD — sygnał logiczny włączenia hamowania dynamicznego

tego iCI. Regulator prądu posiada nastawiane ograniczenie górnej wartości progowej, odpowiadające maksymalnemu prądowi rozruchowemu, wyznaczonemu z wymaganego momentu dynamicznego dla podnoszenia maksymalnego ciężaru, przy założonym przyspieszeniu. W celu ograniczenia przyspieszenia zastosowano układ ograniczający stromość narastania zadanego sygnału prędkości, niezależnie od wartości docelowej określonej kątem wychylenia drążka manewrowego.

Podczas hamowania dynamicznego struktura układu regulacji ulega przełączeniu. Odbywa się ono z aktywną pętlą prądową, podczas gdy regulator prędkości jest wyłączony. Oznacza to, że drążkiem manewrowym zadawany jest prąd obwodu pośredniego, wymuszający prawie proporcjonalny moment hamujący. Prąd wzbudzenia silnika przy hamowaniu jest sterowany za pośrednictwem niezależnego układu regulacji /US-A3/ z ograniczeniem prądowym /2CJ/ w funkcji zadanego prądu obwodu pośredniego I_d .

5. WŁASNOŚCI RUCHOWE MASZYNY

W celu określenia własności ruchowych i eksploatacyjnych maszyny wyciągowej pracującej w układzie TKP przeprowadzono cykl pomiarów, który obejmował m.in.:

- pomiary mocy czynnej i biernej dla cykli jazdy w górę i w dół przy różnych obciążeniach ładunkiem klatki,
- pomiary w stanach ustalonych i dynamicznych prądów stojana i wirnika silnika i transformatora przekształtnikowego,
- pomiary wyższych harmonicznych prądów w uzwojeniach silnika i transformatora oraz w.h. prądu i napięcia sieci zasilającej,
- sprawdzenie prawidłowego działania układu elektronicznego oraz jego odporność na zakłócenia.

5.1. Moment silnika asynchronicznego w układzie TKP

Z analizy wpływu prostownika diodowego przyłączonego do uzwojeń wirnika silnika asynchronicznego wyznaczono zależność momentu od wartości prądu wyprostowanego I_d . Zależność tę określa równanie /10/:

$$M = M_N \cdot P_M \cdot \frac{3}{\pi} \cdot i_d / 2 - i_d / \quad /5/$$

gdzie: $i_d = \frac{I_d}{I_{zw}}$ - względna wartość prądu I_d .

Na podstawie oscylogramów przebiegu prądu I_d w cyklach podnoszenia i opuszczania różnych wcześniej określonych mas wyznaczono spraw-

ność całego układu napędowego. Wyniki pomiarów przedstawia tablica 1.

Pomierzone przyspieszenie maszyny przy pełnym obciążeniu nie przekracza $0,35 \text{ m/s}^2$, a opóźnienie przy zatrzymywaniu nieobciążonej maszyny dochodziło do $1,2 \text{ m/s}^2$.

5.2. Moc czynna i zużycie energii elektrycznej

Przebieg poboru chwilowej mocy czynnej w cyklach podnoszenia i opuszczania zarejestrowano oscylografem pętlicowym typu OSCYLOFIL mierząc moc czujnikiem typu PP53. Równolegle rejestratorem typu WATTREG mierzono moc czynną i bierną. Na rys. 3 przedstawiono zarejestrowany przebieg mocy czynnej przy pracy w układzie z regulacją rezystorową /1/ i w układzie TKP /2/ w cyklu podnoszenia masy $Q = 4000 \text{ kg}$ z poziomu 585 m .

Porównując obydwa przebiegi można zauważyć, że największe różnice występują w czasie rozruchu napędu i przy dojeździe klatki do nadszybia.

Z zarejestrowanych przebiegów, po ich splanimerowaniu, obliczono ilość energii zużytej w poszczególnych cyklach pracy.

Z analizy wyników pomiarów /tabl. 1/ wynika, że przy podnoszeniu 4 t maksymalny pobór mocy maleje z 780 kW przy regulacji rezystorowej, do 285 kW w układzie TKP, a zużycie energii maleje więcej niż 2-krotnie. Biorąc pod uwagę to, że przy opuszczaniu w układzie TKP energia jest oddawana do sieci zasilającej, zastosowanie TKP do napędu maszyny wyciągowej daje znaczne zmniejszenie zużycia energii elektrycznej.

5.3. Oddziaływanie TKP na sieć zasilającą

Ujemną stroną regulacji prędkości obrotowej m.w. w układzie TKP jest zwiększenie poboru mocy biernej oraz obciążenie sieci prądem o znacznym odkształceniu zawierającym wyższe harmoniczne.

Największy przyrost poboru mocy biernej występuje przy rozruchu maszyny i wynosi około $520 \text{ kV}\cdot\text{ar}$, a przy pracy ustalonej przyrost ten nie przekracza $380 \text{ kV}\cdot\text{ar}$. Pogarsza to znacznie współczynnik mocy układu, który średnio w cyklu podnoszenia dla układu TKP wynosi $0,243$.

W celu określenia stopnia wpływu TKP na odkształcenia napięcia w sieci zasilającej 6 kV dokonano pomiarów wyższych harmonicznych prądu kaskady I_k , prądu wirnika I_w oraz napięcia sieci. Dla ładunku $Q = 4000 \text{ kg}$ przy różnych prędkościach podnoszenia i opuszczania z

hamowaniem dynamicznym zarejestrowano na taśmie magnetycznej w.h. Wielkości te poddano analizie spektralnej przy użyciu komputera firmy Bruel - Kjeer.

Wyniki analizy otrzymano w formie wykresów prążków dla poszczególnych częstotliwości. Największy współczynnik odkształcenia prądu wystąpił przy prędkości $V = 4,8$ m/s. W prądzie I_k pojawiają się wtedy podharmoniczne o częstotliwości mniejszej od 50 Hz. Maksymalny współczynnik odkształcenia napięcia sieci zasilającej wynosił $V = 1,4$ % przy dopuszczalnym 5%. Niewielki współczynnik odkształcenia napięcia wynika z znacznej mocy zwarcia na szynach rozdzielni 6 kV, która wynosiła 190 MVA.

TABELA 1

Wyniki pomiarów i obliczeń obciążenia mocą czynną, zużycia energii elektrycznej i sprawności energetycznej maszyny wyciągowej

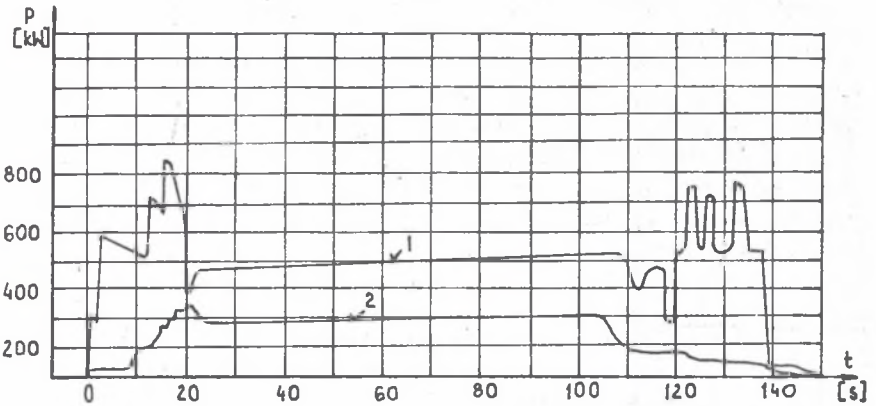
Lp.	Cykle pracy	Obciążenie maksymalne	Obciążenie w stanie ustal.	Wykonana praca	Zużycie energii elektr.		Sprawność energ.
		P_{ms}	P_{ust}	E_m	E_T	E_K	η_E
		kW	kW	kWh	kWh		
1.	Podnoszenie, układ tradycyjny $Q=4000$ kg	780	380	6,38	16,76		0,381
2.	Podnoszenie, układ kaskady $Q=4000$ kg	285	200	6,38	8,16		0,78
3.	Opuszczanie, układ kaskady $Q=4000$ kg	300	175	6,38	4,7		0,74
4.	Podnoszenie, układ kaskady $Q=1450$ kg	550	120	2,31	4,6		0,5
5.	Opuszczanie, układ kaskady $Q=1450$ kg	138	37,5	2,31	0,98		0,42

LITERATURA

1. Kocurek J., Mijał T., Pach Z.: Maszyna wyciągowa z napędem tyrystorowej kaskady podsynchronicznej w KWK "Dymitrow". Wiadomości Górnicze 1988 Nr 7.
2. Koczara W.: Kaskadowe układy napędowe z przekształtnikami tyrystorowymi. WNT, Warszawa 1979.

Recenzent: Doc.dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do Redakcji w maju 1992 r.



Rys. 3. Wykres poboru mocy czynnej w cyklu podnoszenia masy $Q = 4000$ kg:
 1 - w układzie z regulacją rezystorową,
 2 - w układzie TKP

THYRISTOR CASCADE APPLICATION IN DRIVE WINDERS

Summary

Thyristor cascade systems applied in drive of mine winder was discussed. Control systems, speed regulators, test results and operation remarks - all concern winders equipped in thyristor cascades is also given.

ПРИМЕНЕНИЕ ТИРИСТОРНЫХ КАСКАДОВ В ПРИВОДАХ ПОДЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

Резюме

В работе обсуждаются системы тиристорных каскадов в приводах подъемных трансформаторных машин, системы управления и регулирования скорости, а также результаты измерений и замечания по эксплуатации подъемных машин, оборудованных тиристорными каскадами.